فلزگری کهن و استحصال مس در محوطه‌ی باستانی هفت تپّه‌ی خوزستان، هزاره‌ی دوم قبل از میلاد*

(یادداشت پژوهشی)

امید عودباشی[۱]   سید محمدامین امامی[۲]   حسین احمدی[۳]   پرویز دوامی[٤]

چکیده

در این مقاله، به مطالعه‌ی شواهد و بقایای فلزگری کشف شده در محوطه‌ی باستانی هفت تپّه (قرن ١٤ قبل از میلاد) و همچنین، شناسایی بقایای فلزگری کهن بر اساس مطالعات آزمایشگاهی پرداخته شده است. برای آنالیز ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های ساختاری بقایای فلزگری کهن در محوطه‌ی هفت تپّه‌ی خوزستان، از روش‌های آنالیز SEM-EDS و متالوگرافی استفاده شد. نتایج نشان دادند که فرایند فلزکاری در هفت تپّه به‌منظور استخراج مس از سنگ معدن‌های سولفیدی انجام می‌شده است. این فرایند با تشکیل مات در مسِ استخراج شده همراه بوده است و مخلوط مات و مس به‌وسیله فرایند تشویه، خالص‌سازی و برای ساخت اشیاء آماده می‌شده است. بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌ها، اشیای مجموعه‌ی هفت تپّه از آلیاژ مس و سرب و در مواردی، از آلیاژ برنز ساخته شده‌اند. در بعضی از نمونه‌ها، نیکل و روی به‌عنوان ناخالصی‌های فلزی شناسایی شده‌اند. مطالعات ریزساختاری بر روی نمونه‌های اشیاء نشان دادند که برای شکل‌دهی نهایی آن‌ها پس از ریخته‌گری، از عملیّات چکش‌کاری سرد و تاب‌کاری استفاده می‌شده است.

واژه‌های کلیدی فلزگری کهن، هفت تپّه، مات مس، تشویه، آلیاژسازی، برنز، تاب‌کاری.

Archaeometallurgy and Smelting Technology of Copper in Haft Tappeh Ancient Site of Khuzestan; The Second Millennium BC

O. Oudbashi   S. M. Emami   H. Ahmadi   P. Davami

Abstract

In this paper, the evidences and remnants of archaeometallurgical activities in Elamite site of Haft Tappeh (14^{th} century BC) have investigated and identification of archaeometallurgical materials have been done based on analytical investigations. SEM-EDS analysis and metallography were used to identify the chemical composition and microstructural features of archaeometallurgical materials in Haft Tappeh. The results showed that the metallurgical process in Haft Tappeh has been copper smelting from sulfidic ores. This process has been done by matte production and the mixture of matte and copper has been roasted for the purpose of purification in order to produce objects. The metallic objects in Haft Tappeh have been manufactured by copper-lead as well as bronze alloys. In some cases, some metallic elements such as Ni and Zn were observed in composition. Based on the microstructural studies, it could be concluded that an alternating cold working and annealing operation has been used after casting to shape the metallic artifacts.

Keywords Archaeometallurgy; Haft Tappeh; Copper Matte; Roasting; Alloying; Bronze; Annealing.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۱/۸/۱۵ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۲/٦/۲۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، دانشکده مرمّت، دانشگاه هنر اصفهان

(۲) استادیار، دانشکده مرمّت، دانشگاه هنر اصفهان

(۳) استادیار، دانشکده مرمّت، دانشگاه هنر اصفهان

(٤) استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

مقدمه

اهمیّت شکل‌گیری و تحوّل دانش متالورژی در دنیای باستان که به فلزگری کهن (آرکئومتالورژی) موسوم است، به‌حدی است که در قرن‌های ۱۹ و ۲۰ میلادی بر تقسیم‌بندی دوره‌های فرهنگی پیش از تاریخ تأثیر گذاشته است [۱]. گسترش فلزگری در فلات ایران همواره موضوعی جالب توجه برای باستان‌شناسان و دانشمندان بوده است و دلیل آن پیشینه‌ی شاخص فعالیّت‌های فلزگری در ایران از حدود ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد است [2,3]. در حقیقت، تاریخ غنیِ فلات ایران و بقایای گسترده و متنوع فلزگری در نقاط مختلف ایران منبع مهمّی برای مطالعات باستان‌شناسی و فلزگری کهن، به‌خصوص در چند دهه‌ی گذشته، بوده است [4,5,6].

یکی از محوطه‌هایی که در طول سالیان گذشته در ایران مورد مطالعات باستان‌شناسی قرار گرفته است، محوطه‌ی باستانی هفت تپه در خوزستان است. محوطه‌ی هفت تپه در جنوب غربی ایران و در مرکز استان خوزستان واقع شده است (شکل ۱). این مجموعه که شامل ١٤ تپّه‌ی باستانی است و مساحتی در حدود ۱/۷ در ۱/۳ کیلومتر را در بر می‌گیرد، بین سال‌های ١٣٤٤ تا ۱۳۵۷ هجری خورشیدی توسط عزت‌الله نگهبان مورد حفاری‌های باستان‌شناسی قرار گرفته است [۷و8]. در طول ده سال گذشته نیز محوطه‌ی هفت تپه دوباره به سرپرستی بهزاد مفیدی نصرآبادی مورد حفاری‌های باستان‌شناسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حفاری‌های انجام شده، این محوطه متعلق به دوره‌ی ایلام میانه (حدود قرن ١٤ قبل از میلاد) و مرکز فرمانروایی پادشاه ایلامی، *تپتی آهار*، بوده است [۷،10,9,8]. در حفاری‌های انجام شده در این محوطه، آثار مختلفی مانند بقایای معماری خشتی و آجری، اشیای مختلف سفالی، فلزی، سنگی و مانند آن به‌دست آمده است [۷]. در حفاری‌های دوره‌ی اوّل و در کنار آثار و اشیای متنوع و بقایای معماری، مقدار زیادی اشیای فلزی و بقایای فلزکاری [۷، 11]، و نیز، کوره‌ای دو بخشی یافت شده است که احتمالاً برای ذوب و استحصال فلز و ساخت اشیای سفالی استفاده می‌شده است [۷]. در حال حاضر، اشیاء و بقایای استحصال در موزه‌ی هفت تپه نگه‌داری می‌شوند.

هدف از این مقاله، ارائه‌ی نتایج پژوهش در زمینه‌ی عملیّات فلزگری در دوران ایلام میانه در محوطه‌ی هفت تپه‌ی خوزستان است. با توجه به این‌که در حفاری‌های انجام شده در محدوده‌ی سال‌های ١٣٤٤ تا ۱۳۵۷، میزان قابل‌توجهی از بقایای فلزگری و اشیای فلزی به‌دست آمده است، این پژوهش بر نمونه‌های یافت شده در این سال‌ها متمرکز است.

شواهد فلزگری هفت تپّه

در طول عملیّات ساماندهی محیط و انبار موزه‌ی هفت تپّه که از سال ۱۳۸۰ آغاز شد، مجموعه آثار فلزگری از بین اشیاء و بقایای باقی‌مانده از حفاری که در انبار موزه به‌شکل نامطلوبی نگه داشته می‌شدند، خارج شده و مورد مطالعه، دسته‌بندی و جداسازی قرار گرفتند. در بین بقایای به دست آمده، تکه‌هایی از اشیای فلزی نیز یافت شدند که به‌عنوان نمونه‌های مطالعاتی برای انجام آزمایش‌های مختلف نگه‌داری می‌شوند [۱۲]. بقایای فلزگریِ موجود در موزه در واقع قطعاتی هستند که به‌عنوان اشیای موزه‌ای مورد توجه نیستند. این قطعات شامل تکه‌های سرباره، کلوخه‌های فلزی با لایه‌ی قطوری از محصولات خوردگی، چند تکه سنگ و قطعات فلزی‌ای هستند که بعضی از آن‌ها بقایای اشیای فلزی هستند.

در کنار بقایای فلزگری، مجموعه‌ای از اشیای فلزی به‌دست آمده از حفاری‌های دو دوره‌ی ذکر شده وجود دارند که به‌عنوان اشیای موزه‌ای مورد نگه‌داری و نمایش قرار می‌گیرند. مجموعه‌ی اشیاء متعلّق به حفاری‌های دکتر نگهبان، شامل حدود ۲۵۰ شیء فلزی است که با توجه به رسوب‌های سطحی و ظاهر آن‌ها،

به‌نظر می‌رسد که بیش‌تر آن‌ها آلیاژ مس باشند. افزون بر این، تعداد بسیار کمی از آن‌ها از ترکیبات آهن ساخته شده‌اند [۱۲، ۱۳].

روش پژوهش

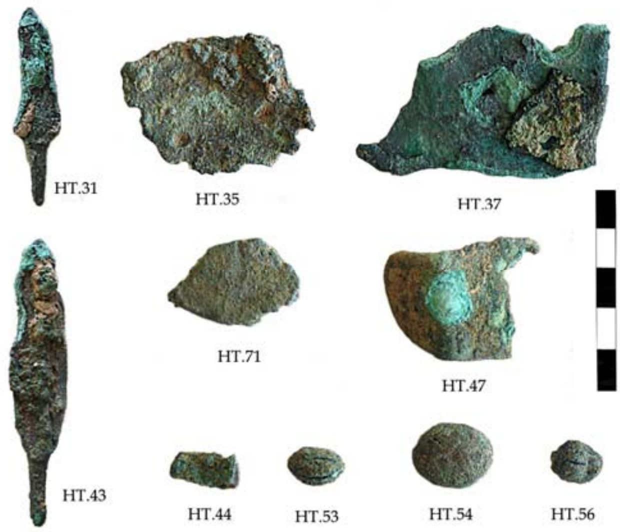
برای شناسایی فرایند فلزگری در محوطه‌ی هفت تپّه، دو نمونه از کلوخه‌ها و ده نمونه از اشیای مطالعاتی موزه‌ی هفت تپّه مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۲ و ۳). از هر نمونه، یک مقطع صیقلی تهیّه شد. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از روش آنالیز SEM-EDS شناسایی شد. برای مطالعات ریزساختاری، نمونه‌های آزمایش با میکروسکُپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکُپ نوری پلاریزان مطالعه شدند. آنالیزهای SEM-EDS با استفاده از دستگاه SEM-EDS ساخت شرکت PHILIPS مدل XL30، در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس انجام شدند. مطالعات میکروسکُپی پلاریزان نیز با استفاده از میکروسکُپ پلاریزان (با نور انعکاسی) انجام گرفت.



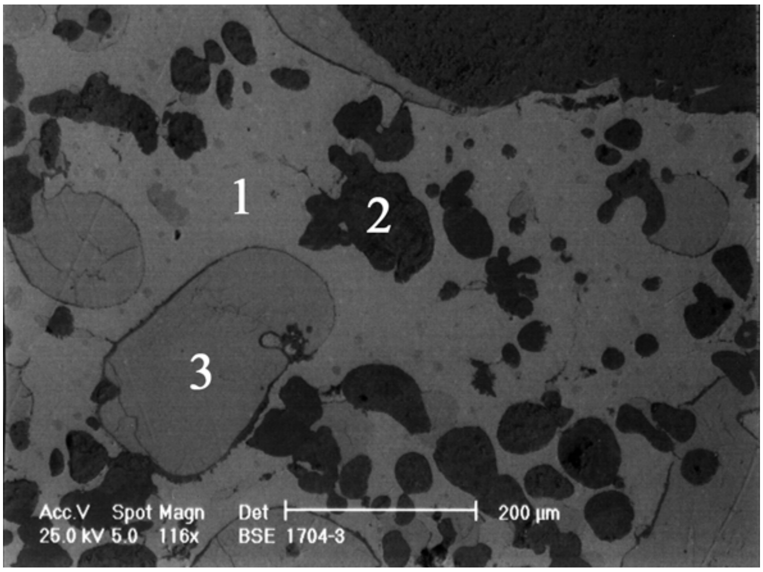
شکل ۱ نقشه‌ی موقعیّت جغرافیایی محوطه‌ی ایلامی هفت تپّه‌ی خوزستان



شکل ۲ یک نمونه از کلوخه‌های فلزی هفت تپّه



شکل ۳ اشیای فلزی آزمایش شده متعلّق به محوطه‌ی هفت تپّه



شکل ٤ تصویر SEM-BSE از نواحی آنالیز شده از نمونه‌ی HT.17. ریزساختار شامل فاز زمینه (آنالیز ۱)، فاز تیره (آنالیز ۲) و فاز خاکستریِ روشن (آنالیز ۳) است. بزرگ‌نمایی ۱۱٦ برابر.

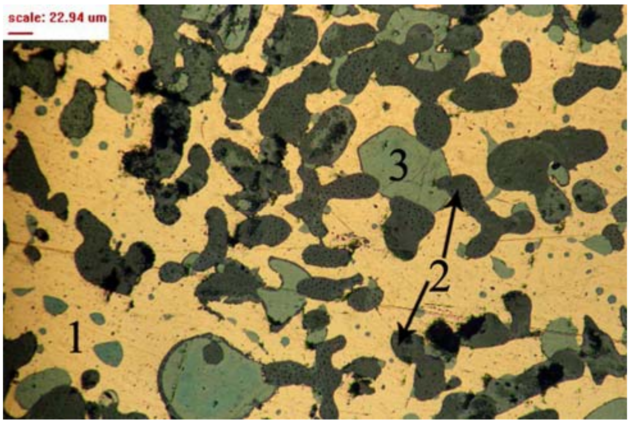
نتایج و بحث

کلوخه‌های فلزی. برای شناسایی ترکیب شیمیایی کلوخه‌های فلزی، دو نمونه‌ی HT.13 و HT.17 مطالعه شدند. با توجه به تصویرهای میکروسکُپ الکترونی، سه فاز مشخص در ریزساختار نمونه‌ها قابل مشاهده‌اند: فاز روشنِ زمینه، فاز خاکستری شامل آخال‌های بزرگ و فاز تیره که آخال‌های کوچک‌تری را در بر می‌گیرند (شکل ٤). تصویر میکروسکُپی پلاریزان از مقطع صیقلی نمونه‌ی HT.17 در شکل (٥) دیده می‌شود. زمینه زرد رنگ است و جلای فلزی شبیه به مس از خود نشان می‌دهد. درون فاز زمینه‌ی زرد رنگ، دو فاز با رنگ‌های سبز روشن و سبز– سیاه دیده می‌شوند. از سوی دیگر، در بعضی از نقاط این نمونه، حفره‌هایی در محل فاز تیره رنگ (مربوط به آنالیز شماره‌ی ۲ در نمونه‌ها) مشاهده

می‌شوند. افزون بر این، ساختار دندریتی حاصل از انجماد فازهای سبز- سیاه را در آن می‌توان مشاهده کرد.

از فازهای مورد نظر، آنالیز عنصری به‌روش آنالیز نقطه‌ای SEM-EDS گرفته شد. در مجموع، ٦ آنالیز بر روی دو نمونه‌ی کلوخه انجام شد. نتایج آنالیز این دو نمونه بر پایه‌ی درصد وزنی، در جدول (۱) ارائه شده‌اند. آنالیز شماره‌ی ۱ در هر دو نمونه بیان‌گر فاز غنی از مس و تشکیل دهنده‌ی زمینه‌ی نمونه‌هاست. در نمونه‌ی شماره‌ی HT.13، مقدار قابل توجهی آهن، نیکل، سرب و منیزیم در ترکیب دیده می‌شود. نمونه‌ی شماره‌ی HT.17 نیز میزان قابل توجهی آهن در ترکیب خود دارد. ترکیب فاز تیره رنگ نیز در آنالیز شماره‌ی ۲ نمونه‌ها ارائه شده است. این فاز میزان بالایی آهن دارد و مقدار قابل توجهی مس و نیکل نیز در آن دیده می‌شود. مقدار سرب و منیزیم در فاز تیره رنگ مربوط به نمونه‌ی HT.13 نسبتاً قابل توجه است. آنالیز فاز خاکستری رنگ (آنالیز شماره‌ی ۳) نیز نشان می‌دهد که ترکیب آن حاوی مس، گوگرد و آهن است.

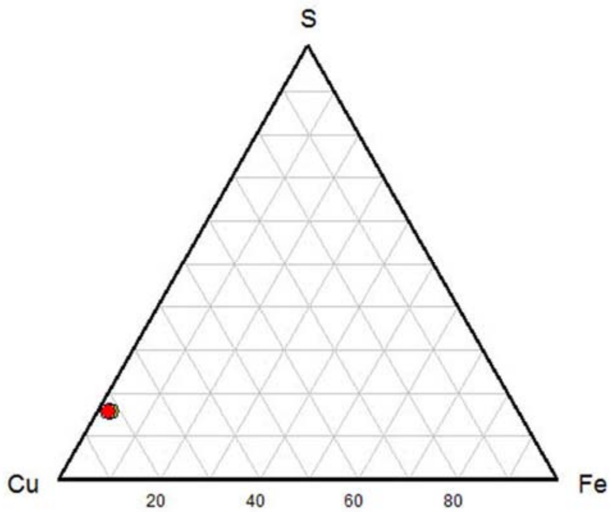
شکل (٦) ترکیب فازهای خاکستری رنگ موجود در نمونه‌ها را در سیستم Cu-Fe-S و بر اساس نتایج آنالیز SEM-EDS (آنالیز ۳ مربوط به هر دو نمونه) نمایش می‌دهد. با توجه به میزان مس و گوگرد موجود در نمونه، این فاز احتمالاً حاوی مقدار زیادی سولفید مس است. با توجه به میزان بالای مس در نتیجه‌ی حاصل از آنالیز این فاز و نسبت وزنی حدود ٤ به ۱ مس به گوگرد در ترکیبات سولفیدی مس مانند کالکوسیت (Cu_2S) و دیجنیت (Cu_9S_5)، احتمالاً بخش قابل ملاحظه‌ای از این فاز خاکستری رنگ را کالکوسیت یا دیجنیت تشکیل داده است. در کنار این ترکیب و با توجه به وجود حدود ۲ درصد آهن در نتیجه‌ی حاصل از آنالیز، احتمال وجود مقدار کمی سولفید آهن (مانند پیروتیت ($Fe_{1-x}S$)) در این فاز وجود دارد [14].



شکل ٥ تصویر میکروسکُپی مربوط به نمونه‌ی شماره‌ی HT.17. ساختار دندریتی حاصل از انجماد فاز تیره رنگ غنی از آهن (شماره ۲) در زمینه‌ی مس (شماره ۱) همراه با فاز سبز رنگ (شماره ۳)، پیش از حکّاکی، بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر.

جدول ۱ نتایج حاصل از آنالیز SEM-EDS مربوط به فازهای موجود در دو نمونه‌ی کلوخه‌ی فلزی (بر حسب درصد وزنی)

	Ag	Al	As	Ca	Cl	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	S	Sb	Si	Sn	Zn
HT.13-1	0.58	0.26	0.67	–	0.14	89.04	2.77	1.07	0.25	1.38	2.24	–	0.18	0.36	0.67	0.39
HT.13-2	–	0.37	0.67	–	0.54	7.47	64.33	3.10	0.19	1.72	19.57	0.52	0.35	0.91	0.26	–
HT.13-3	0.36	0.33	0.56	–	–	80.00	2.23	0.49	0.29	0.27	–	15.17	0.31	–	–	–
HT.17-1	–	–	–	–	–	96.24	2.88	–	–	0.88	–	–	–	–	–	–
HT.17-2	–	0.92	–	0.20	0.76	4.74	90.29	–	–	2.20	–	0.32	–	0.56	–	–
HT.17-3	–	0.53	–	0.13	–	81.12	1.78	–	–	0.36	–	15.29	–	0.79	–	–



شکل ٦ نمودار مربوط به سیستم Cu-Fe-S. نتایج حاصل از آنالیز فازهای خاکستری رنگ (آنالیز ۳) در کلوخه‌های فلزی

جدول ۲ نتایج حاصل از آنالیز SEM-EDS بر روی اشیای فلزی (بر حسب درصد وزنی)

	Al	Ag	Cl	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	S	Sb	Si	Sn	Zn
HT.31	0.79	0.39	0.16	92.82	0.29	0.97	0.20	1.04	1.15	0.34	–	0.93	0.46	0.12
HT.35	0.94	0.41	0.39	93.20	0.32	0.98	0.19	0.94	–	0.39	0.11	0.59	0.77	0.77
HT.37	0.57	0.64	0.36	91.37	0.44	0.80	0.27	0.79	2.25	0.44	0.33	0.54	0.51	0.70
HT.43	–	–	–	93.26	0.12	–	–	0.77	4.97	–	–	0.20	0.25	0.43
HT.44	0.47	0.45	0.12	87.20	0.25	0.80	0.08	0.38	2.14	0.30	0.79	0.67	5.50	0.85
HT.47	0.17	–	6.87	67.27	0.39	0.45	0.16	0.56	3.98	0.60	–	1.06	17.96	0.10
HT.53	0.96	0.48	14.34	75.44	0.38	0.35	0.09	0.57	0.89	1.01	–	0.66	3.20	0.72
HT.54	1.08	0.26	0.17	68.39	0.15	2.03	0.02	4.76	18.22	2.02	0.33	1.77	0.15	0.47
HT.56	–	0.15	0.09	94.30	0.27	0.32	0.11	0.87	1.20	–	0.22	1.06	0.29	1.10
HT.71	0.32	0.20	0.11	95.16	0.44	0.40	0.12	0.39	0.61	0.38	0.33	1.04	0.15	0.35

اشیاء. برای شناخت ترکیب فلز/آلیاژ به‌کار رفته در ساخت اشیای محوطه‌ی هفت تپّه، ۱۰ نمونه از آن‌ها (شکل (۳)) مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. آنالیز با استفاده از روش SEM-EDS انجام شد. نتایج حاصل در جدول (۲) ارائه شده است.

مطابق با نتایج آنالیز، کلیه‌ی نمونه‌ها حاوی میزان بالایی مس (حدود ٦۷ تا ۹۵ درصد) هستند. عناصر دیگر فلزی مهم که معمولاً در ترکیب این اشیای فلزی باستانی مشاهده می‌شوند و بیش از یک درصدِ ترکیب را به خود اختصاص می‌دهند، شامل قلع، سرب، نیکل و روی هستند. حضور عناصری مانند آلومینیم، کلر، منیزیم، گوگرد و سیلیسم نیز در بعضی از نمونه‌ها چشم‌گیر است که می‌تواند به‌دلیل حضور بلند مدّت نمونه‌ها در خاک یا متأثر از سنگ معدن اولیّه باشد. آهن و نقره نیز به‌عنوان عناصر کم‌یاب در نمونه‌ها دیده می‌شوند. این فلزات هم بقایای سنگ معدن اولیّه در ترکیب فلز هستند.

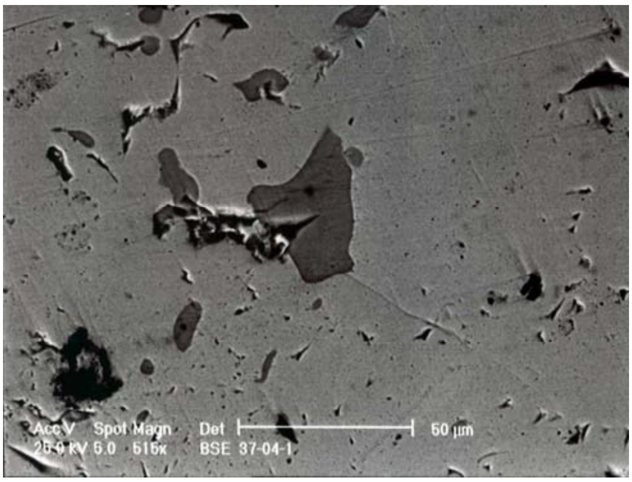
نتایج نشان می‌دهند که سرب و قلع نقش مهمی در فرایند آلیاژسازی در نمونه‌های آنالیز شده دارند. بر این اساس، نمونه‌ها را می‌توان به سه گروه اصلی به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

مس (HT.71 ،HT.35)، مس سربی (HT.31، HT.37، HT.43، HT.54 و HT.56) و برنز قلعی سربی (HT.44، HT.47 و HT.53). به آلیاژهایی متشکّل از مس و سرب، مس سربی یا مس سرب‌دار گفته می‌شود (مانند نمونه‌های HT.37 و HT.43) [۱۵]. مس و سرب در هم محلول نیستند و حین سرد شدن این دو فلز غیر محلول در یک‌دیگر از حالت مذاب، سرب که نقطه‌ی

ذوب پایین‌تری دارد (۳۲۷/۵ °C) به‌شکل گویچه‌هایی در مرز دانه‌های مس که نقطه‌ی ذوب بالاتری دارد (۱۰۸٤/۵ °C) رسوب می‌کند [16]، امّا سه نمونه نیز وجود دارند که حاوی مس، قلع و سرب هستند. این نمونه‌ها نشان‌دهنده‌ی استفاده از آلیاژ مِفرغ یا برنز در ساخت این اشیاء است. در حوزه‌ی فلزگری کهن، منظور از برنز یا مِفرغ آلیاژی از مس است که جزء اصلی آلیاژساز آن صرفاً قلع است. این آلیاژ در متالورژی جدید به برنز قلعی (سیستم دوجزیی Cu-Sn) مشهور است. در بعضی از موارد، سرب نیز به این سیستم اضافه می‌شود و سیستم سه‌جزیی مس- قلع-سرب (Cu-Sn-Pb) با دمای ذوب پایین‌تر را تشکیل می‌دهد [17,18]. در بسیاری از موارد، آلیاژهای مس-قلع با بیش از ۲ تا ۳ درصد قلع را به‌عنوان آلیاژهای برنز تعمّدی می‌شناسند [19]. میزان قلع استفاده شده در نمونه‌ها متفاوت است و در نمونه‌ی HT.47 به حدود ۱۸ درصد می‌رسد، امّا در دو نمونه‌ی برنزی دیگر (HT.44 و HT.53)، درصد قلع ۵/۵ و ۳/۲ درصد است که میزان کمی را به خود اختصاص داده است. به‌دلیل حضور سرب در این نمونه‌ها، آن‌ها را برنز سرب‌دار یا سربی می‌گویند [16].

تنوّع ترکیب و آلیاژ و تفاوت میزان عناصر آلیاژساز در نمونه‌های آزمایش شده (مانند میزان متفاوت قلع و سرب در آن‌ها) و حضور قابل ملاحظه‌ی عناصر فلزی متفاوت در بعضی از آن‌ها مانند نیکل و روی، نشان می‌دهد که فرایند فلزگری در هفت تپّه بر اساس یک روند مشخص انجام نمی‌شده و تولید آلیاژ احتمالاً به‌شکلی کنترل‌نشده صورت می‌گرفته است. به همین دلیل، میزان عناصر آلیاژی در نمونه‌ها متفاوت بوده است و ناخالصی‌های متفاوت نیز احتمالاً از سنگ معدن وارد ترکیب فلز شده‌اند.

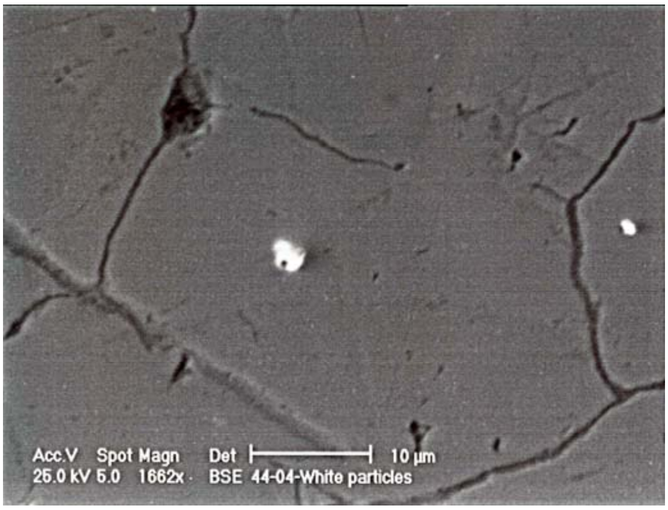
ریزساختار نمونه‌های اشیاء پیش از حکّاکی در نور پلاریزه و در تصویرهای میکروسکُپ الکترونی، حاوی ناخالصی‌های مختلفی است که در تصویرهای SEM-BSE به رنگ خاکستری تیره یا سفید در زمینه‌ی فلزی دیده می‌شوند (شکل ۷ و ۸). مطابق با نتایج حاصل از آنالیز ناخالصی‌های خاکستری تیره (آنالیزهای ۱ در جدول ۳)، مس، گوگرد و آهن در ترکیب آن‌ها وجود دارند و این ترکیب مشابه با فاز سبزِ روشن در کلوخه‌های فلزی است. آنالیز یک نمونه از ناخالصی سفید رنگ نشان داد که این ناخالصی حاوی فاز غنی از سرب است (آنالیز HT-44-2).



شکل ۷ تصویر SEM-BSE از یکی از آخال‌های تیره رنگ در ساختار اشیاء. (نمونه HT.37) ترکیب این آخال‌ها حاوی سولفید مس است. بزرگ‌نمایی ۵۱۵ برابر

جدول ۳ نتایج حاصل از آنالیز SEM-EDS بر روی ناخالصی‌های موجود در ریزساختار اشیاء (بر حسب درصد وزنی)

	Ag	Al	As	Cl	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	S	Sb	Si	Sn	Zn
HT-35-1	0.76	0.00	0.00	0.13	77.88	1.25	0.89	0.33	0.54	0.62	14.79	0.99	0.68	0.49	0.65
HT-37-1	0.57	0.93	0.00	0.23	75.50	2.08	0.48	0.37	0.47	1.30	15.04	0.40	1.30	0.84	0.50
HT-44-1	0.80	0.25	0.26	0.06	79.03	0.64	0.72	0.21	0.35	0.00	15.19	0.21	0.48	1.13	0.68
HT-44-2	0.70	0.24	0.00	2.05	23.30	0.29	0.00	0.33	0.37	58.72	11.07	0.00	0.62	1.98	0.32



شکل ۸ تصویر SEM-BSE از یکی از آخال‌های روشن در ساختار اشیاء. این آخال‌ها فاز غنی از سرب هستند. بزرگ‌نمایی ۱٦٦۲ برابر.

در حقیقت، می‌توان دریافت که ناخالصی‌های تیره رنگ موجود در ساختار اشیای فلزی بقایای سولفید مس تشکیل‌دهنده‌ی سنگ معدن هستند که در فرایند استحصال مس در بافت فلز باقی مانده‌اند. ذرات سفید رنگ موجود در بافت نیز گویچه‌های سربی هستند که در زمینه‌ی فاز آلفا حل نشده‌اند و به‌شکل ذرات جداگانه در فلز دیده می‌شوند.

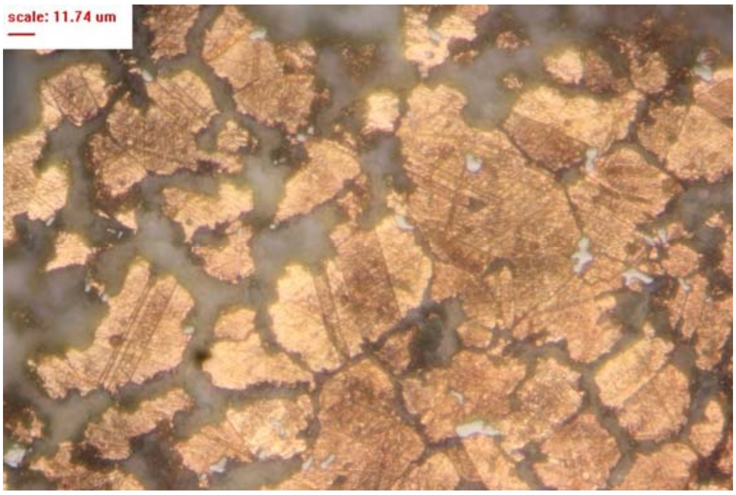
به‌منظور شناسایی عملیّات انجام شده در شکل‌دهی قطعات و اشیای فلزی، مقطع صیقلی شده‌ی نمونه‌ها در محلول آبی کلرید آهن III حکّاکی شدند و در زیر نور پلاریزه با استفاده از میکروسکُپِ متالوگرافی مطالعه شدند. ریزساختار شامل دانه‌های هم‌محورِ تغییر شکل داده از نوع محلول جامد آلفا همراه با خطوط دوقلویی در درون دانه‌ها بود (شکل ۹ و ۱۰). فلزات FCC مانند مس (محلول جامد آلفا در مس و سیستم Cu-Sn)، به‌وسیله‌ی فرایند دوقلویی تبلور مجدد می‌یابند. بلورهای جدیدی که پس از تاب‌کاری قطعات تغییرشکل یافته از آلیاژهای مس به‌وجود می‌آیند، اثری مانند صفحه‌ی انعکاس آینه در بلور ایجاد می‌کنند که موجب ایجاد خطوط صاف و موازی در برخی یا تمام بلورها می‌شود. این حالت در مقطع عرضی نمونه‌ی حکّاکی شده قابل مشاهده است. خطوط دوقلویی صاف بیان‌گر این هستند که تاب‌کاری عملیّات نهایی در شکل‌دهی قطعه بوده است، امّا وجود خطوط دوقلویی کج و نیز خطوط کرنش درون دانه‌ها نشان می‌دهد که عملیّات نهایی شامل کار سرد بر روی شیء بوده است [۱۵]. فرایند چکش‌کاری در حقیقت، برای تبدیل شمش یا قطعه‌ی برنز ریختگی به شیء مورد نظر بوده است که در طی آن، قطعه‌کارسخت می‌شود. برای رفع این مشکل و بازگشت کارپذیری به قطعه، از عملیّات حرارتی (تاب‌کاری) استفاده شده است. در این عملیّات، قطعه‌ی مورد نظر تا دمایی بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (برای آلیاژهای مس) حرارت داده می‌شده و مجدداً بر روی آن تغییر شکل انجام می‌شده است. این چرخه‌ی تغییر شکل سرد و تاب‌کاری تا حصول شکل مورد نظر ادامه می‌یافته

است [15,20,21].

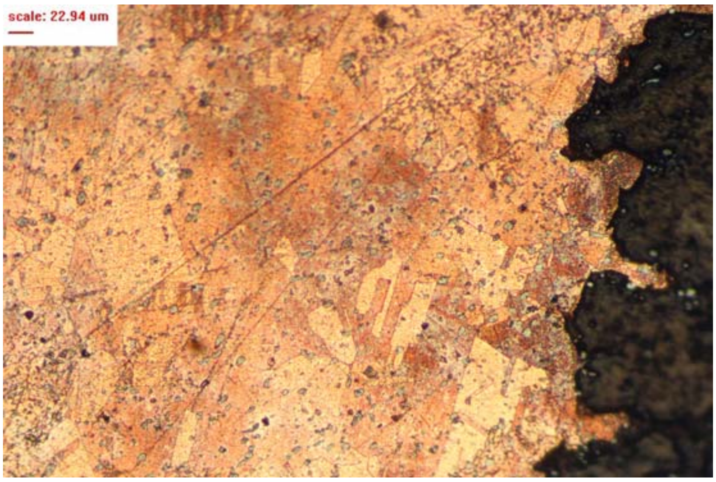
فلزگری در محوطه‌ی هفت تپّه. با توجه به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان دریافت که فرایند اصلی فلزکاری در هفت تپّه، استخراج مس از سنگ‌های معدن سولفیدی مس و ساخت اشیاء از آلیاژهای مس و به‌خصوص برنز بوده است. وجود مقدار قابل ملاحظه‌ای از کلوخه‌های فلزی حاوی میزان بالایی از سولفید مس در محوطه‌ی هفت تپّه، نشان می‌دهد که این فرایند با تولید مات در بافت فلزی مسِ استخراج شده همراه بوده است و عملیّات تشویه بر روی این مخلوط (مات و مس فلزی) برای ساخت اشیاء انجام گرفته است. به‌طور کلّی، در دوران باستان با توجه به محدودیّت‌های مختلف در زمینه‌ی دست‌یابی به شرایط استحصال مستقیم و ذوب سنگ معدن، فرایند استخراج مس از سنگ‌های معدن سولفیدی به دو روش انجام می‌شده است:

– استحصال مات [22,24]، و

– استحصال توأمان سنگ معدن سولفیدی با یک سنگ معدن اکسیدی مس [23,25].



شکل ۹ ریزساختار نمونه‌ی HT.44 که شامل دانه‌های تغییر شکل یافته و تبلور مجدد یافته‌ی محلول جامد آلفا است. نمونه در محلول آبی کلرید آهن III حکّاکی شده است. بزرگ‌نمایی ٤۰۰ برابر.



شکل ۱۰ ریزساختار نمونه‌ی HT.43 مشابه با نمونه‌ی HT.44 بوده و شامل دانه‌های تغییر شکل یافته و تبلور مجدد یافته‌ی محلول جامد آلفا است. نمونه در محلول آبی کلرید آهن III حکّاکی شده است. بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر

استحصال مـات مراحـل مختلفـی دارد و در هـر یک از آن‌ها سعی می‌شده اسـت تـا بخشـی از گـوگرد موجود در ترکیب سنگ معدن به‌وسیله‌ی فرایند تشویه خارج شود. ایـن‌کـار بـا قرارگیـری در محـیطِ حـاوی اکسیژن و در دمای پایین انجام می‌شده است و نتیجه‌ی آن، تبدیل سنگ معدن سولفیدی به اکسیدی بـه‌منظـور انجام استحصال بعـدی مـس از سـنگ اکسـیدی بـوده است.

مراحل و شیوه‌های مختلف تشویه و استحصال مات را می‌توان به‌صورت زیر ارائه کرد:

– تشویه‌ی کامل (مُرده)، شامل تبدیل کامل سنگ معدن سولفیدی به اکسـیدی. معمـولاً در دوران باسـتان و در مرحله‌ی اول، امکان تبدیل کامل وجود نداشته اسـت و به مراحل دیگری نیاز بوده است:

$$CuFeS_2 + 3O_2 \rightarrow FeO + CuO + 2SO_2 \uparrow$$

– تشویه‌ی جزیی که در آن، بخشی از سولفید مـس در سنگ معدن خارج می‌شود و محصول نیاز به تشـویه‌ی مجدد دارد:

$$4CuFeS_2 + 7O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4CuS + 4SO_2 \uparrow$$

– تشکیل مات که در آن، با حرارت‌دهی سـنگ معـدن ترکیبی از سولفید مس و آهن به‌دست می‌آید:

$$CuFeS_2 + 5O_2 + 2FeS_2 \rightarrow FeS + CuS + 2FeO + 4SO_2 \uparrow$$

– تشویه‌ی مات که برای تبدیل مات به فاز اکسـیدی و به‌منظور استخراج مس صورت می‌پذیرد:

$$CuS + FeS + 3O_2 \rightarrow CuO + FeO + 2SO_2 \uparrow$$

– فرایند احیا. در این مرحله، مس فلزی از اکسید مـس استخراج می‌شود. در این مرحله، کوره شـرایط احیـایی (عاری از اکسیژن) دارد:

$$CuO + CO \rightarrow Cu + CO_2 \uparrow$$

– سرباره‌سازی که در آن، اکسید آهن و کوارتز موجود در مذاب با هم واکـنش مـی‌دهنـد و سـپس، بـه‌شـکل سرباره دور ریخته می‌شوند:

$$2FeO + SiO_2 \rightarrow 2FeO.SiO_2$$

– فرایند تصفیه. در این مرحلـه، ناخالصـی‌هـای فلـزی موجود در مس به‌وسیله‌ی اکسیژن از آن جدا می‌شوند:

$$2Fe(+Sn, As,...) + O_2 \rightarrow 2FeO\ (+\ \text{ناخالصی})$$

حاصل فرایند استحصـال مـات معمـولاً مقـداری مـس فلزی، مقداری مات همراه با سرباره بوده است [23].

در روش استحصال توأمان، فرایندی رخ می‌دهـد که در آن واکـنش بـین سـولفیدها و اکسـیدها موجـب تبدیل گوگرد و اکسیژن به گاز SO_2 می‌شود [26]:

$$3Cu_2O + CuFeS_2 \rightarrow FeO + 2SO_2 + 6Cu$$

نتایج مطالعه در هفت تپّه نشان مـی‌دهنـد کـه از روش‌های تشویه‌ی جزیـی و تشـکیل مـات و سـپس، تشویه‌ی مات و احیاء بـرای تولیـد و استحصـال مـس به‌منظور ساخت اشیاء اسـتفاده شـده اسـت. البتـه ایـن فرایند با سرباره‌سازی نیز همراه بـوده اسـت و بقایـای سرباره‌های استحصال مس نیز در ایـن محوطـه کشـف شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [11].

مطالعـه بـر روی اشـیای مجموعـه‌ی هفـت تپّـه نشان‌دهنده‌ی ساخت آلیاژهای مس است. درصد و نوع عناصر آلیاژساز در نمونه‌های آنالیز شده بـا یـک‌دیگـر متفاوتند و الگوی مشابهی را نمایش نمی‌دهند. تفـاوت در میزان قلع را می‌توان به ۱) استحصال توأمـان سـنگ معدن مس و قلع و یا ۲) آلیاژسازی بـا افـزودن مقـدار متغیـر کاسـیتریت بـه مـس، نسـبت داد. در روش استحصال توأمان، استحصال در مورد مخلوطی از سنگ معدن سولفیدی یا اکسیدی مـس همـراه بـا کاسـیتریت انجام می‌شده است که حاصل آن، برنز قلعی همـراه بـا ناخالصی بوده است. در روش دوّم، مقداری کاسیتریت را در بوته به مس فلزی (در اینجا مخلوط مات و مس) می افزودند و مجموعه را بـا ذغـال پوشـش مـی‌داده و سـپس حـرارت مـی‌داده‌انـد. نتیجـه‌ی ایـن روش نیـز می‌توانست مشابه با روش اوّل باشد [19,27,28].

بیش‌تر نمونه‌های اشیاء حاوی میزان قابل‌توجهی سرب هستند. وجود سرب در اشیاء می‌تواند هم به‌دلیل افزودن آن به‌عنوان عنصر افزودنی به‌منظور بالا بردن شکل‌پذیری و چکش‌خواری به اشیاء و هم به‌دلیل وجود سولفید سرب در سنگ معدن و عدم جداسازی کامل آن از مس و تخلیص مسِ مورد استفاده باشد.

نتیجه‌گیری

برای شناسایی فرایند فلزگری در محوطه‌ی هفت تپّه‌ی خوزستان متعلق به حدود ۱٤۰۰ سال قبل از میلاد، تعدادی از کلوخه‌ها و قطعات (اشیای) فلزیِ کشف شده در حفاری‌های دکتر عزت‌ا... نگهبان مورد آنالیز شیمیایی و مطالعات میکروسکُپی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که کلوخه‌های فلزی مخلوطی از مس فلزی و مقدار قابل توجهی سولفید مس و سولفید آهن به‌شکل فازهای پخش شده در زمینه‌ی فلزی هستند و در حقیقت، به‌عنوان مات شناخته می‌شوند. از سوی دیگر، مطالعات انجام شده بر روی اشیاء نیز بیان‌گر استفاده از مس و آلیاژهای آن شامل مس سربی و برنز سربی، در ساخت نمونه‌ها بوده است. درصد عناصر افزوده شده به مس در نمونه‌ها مشابه نبوده‌اند و این نشان‌دهنده‌ی عدم استفاده از عملیّات کنترل شده‌ی آلیاژسازی در هفت تپّه است. نشانه‌های استفاده از سنگ معدن‌های سولفیدی برای استحصال به‌شکل آخال‌های سولفید مس همراه با کمی سولفید آهن در زمینه‌ی فلزی اشیاء دیده شد. میزان بالای سرب در بعضی از نمونه‌ها نیز احتمالاً بیان‌گر افزودن عمدی سرب به‌منظور بالا بردن میزان کارپذیری قطعات بوده است. مطالعات میکروسکپُی نیز نشان دادند که برای شکل‌دهی قطعات از چرخه‌ی تغییر شکل سرد و تاب‌کاری استفاده شده است. در حقیقت، فرایند فلزگری مس در محوطه‌ی هفت تپّه شامل استفاده از سنگ معدن سولفید مس، تشویه‌ی سنگ معدن و تولید مات، تشویه‌ی مات و سرباره‌سازی، استفاده از مس تشویه شده همراه با ناخالصی‌های قابل توجه در ساخت فلز، تولید آلیاژ مس سربی و برنز و در نهایت، شکل‌دهی قطعه‌ی ریختگی به‌شکل مورد نظر بوده است. برای تکمیل مطالعات فلزگری، نیاز است تا مطالعات بر روی تعداد بیش‌تری نمونه انجام گیرد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از آقایان مهندس عبدالرحیم رضایی مسوول آزمایشگاه SEM در دانشگاه تربیت مدرس تهران، فرهاد ایل‌بگ از آزمایشگاه متالوگرافی و آماده‌سازی نمونه در مرکز تحقیقات و آزمایشگاه شرکت فراورده‌های نسوز آذر در اصفهان، آقایان و خانم‌ها دکتر محمد مرتضوی و مهندس عاطفه شکفته از دانشگاه هنر اصفهان، دکتر بهزاد مفیدی نصرآبادی رئیس هیأت باستان‌شناسی محوطه‌ی هفت تپّه و همچنین، از دوستان و همکاران وقت پروژه‌ی چغازنبیل و هفت تپّه آقایان حمید فدایی، مهدی مداحی گیوی، سعید قربانی، محمدرضا رکنی، علی زلقی، رضا وحیدزاده و دیگر دوستانِ همکار در این پروژه به‌خاطر مساعدت‌هایشان در پیشبرد این تحقیق، سپاس‌گزاری می‌نمایند.

مراجع

۱. فاگان، ب.، "*سرآغاز: درآمدی بر باستان‌شناسی (اصول، مبانی و روش‌ها)*"، ترجمه غ. شاملو، انتشارات سمت، تهران، (۱۳۸۲).

2. Thornton, C. P., "The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine Paradigm", Journal of World Prehistory, Vol. 22, pp. 301.327, (2009).

3. Pigott, V. C., "On the Importance of Iran in the Study of Prehistoric Copper-Base Metallurgy",

Proceedings of International Conference, Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology, Stöllner T., Slotta R. and Vatandoust, A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, pp, 28-43, (2004).

4. Arab, R. and Rehren, T., "The Pyrotechnological Expedition of 1968", Proceedings of International Conference, Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology, Stöllner T., Slotta R. and Vatandoust, A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, pp. 550-555, (2004).

5. Pleiner, R., "Memories of the Archaeometallurgic Expeditions to Iran and Afghanistan in the Years 1966 and 1968", Proceedings of International Conference, Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology, Stöllner T., Slotta R. and Vatandoust. A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, pp. 556-560, (2004).

6. Thornton, C. P. and Rehren, T., "Report on the First Iranian Prehistoric Slag Workshop", Iran, Vol. XLV, pp, 315-318, (2007).

۷. نگهبان، ع.، "*حفاری هفت تپّه دشت خوزستان*"، سازمان میراث فرهنگی کشور، تهران، (۱۳۷۲).

8. Mofidi-Nasrabadi, B., "Elam: Archaeology and History", Proceedings of International Conference, Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology, Stöllner T., Slotta R. and Vatandoust, A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, pp. 294-309, (2004).

9. Potts, D. T., "*The Archaeology of Elam: Formation and Transformation of an Ancient Iranian State*", Cambridge University Press, Cambridge, (1999).

10. Mofidi-Nasrabadi, B., "*Vorbericht der Archäologischen Ausgrabungen der Kampagnen 2005-2007 in Haft Tappeh (Iran)*", Mit Beiträgen von D. Prechel und R. Vahidzadeh, Münster, (2010).

11. Oudbashi, O., Emami, S. M. and Bakhshandehfard, H., "Preliminary Archaeometallurgical Studies on Mineralogical Structureand Chemical Composition of Ancient Metal Objects and Slag from Haft Tepe, Southwest Iran, Khuzestan (Middle Elamite Period)", Proceedings of 36th International Symposium on Archaeometry, ISA 2006, 2-6 May 2006, Moreau, J. F., Auger, R., Chabot, J. & Herzog, A. (Eds.), Université Laval, Quebec City, Canada, CELAT Publications, Quebec, pp. 407-412, (2009).

۱۲. قربانی، س.، "گزارش بررسی و ساماندهی اشیای فلزی موزه‌ی هفت تپّه"، مرکز اسناد و کتابخانه پروژه چغازنبیل و هفت تپّه، انتشار نیافته، (۱۳۸۲).

۱۳. ایاسی، م. و بابر شمسی، پ.، "مطالعات اولیّه و ساماندهی اشیای فلزی هفت تپّه"، (ویرایش، بازآرایی و مطالعات تاریخی و تطبیقی: س. قربانی) مرکز اسناد و کتابخانه پروژه چغازنبیل و هفت تپّه، انتشار نیافته، (۱۳۸۰).

14. Klein, C. and Hurlbut Jr., C. S., "*Manual of Mineralogy*", Revised 21st Edition (After J.D. Dana), John Wiley and Sons INC., Toronto, (1999).

۱۵. فرهنگ، پ.، "*فرهنگ بزرگ متالورژی و مواد و ضمیمه*"، انتشارات دنیا، تهران (۱۳۷۹).

16. Scott, D. A., "*Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*", Getty Conservation Institute, Los Angeles, (1991).

17. Scott, D. A., "*Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants and Conservation*", Getty Conservation Institute Publications, Los Angeles, (2002).

18. France-Lenord, A., "*Ancient Metals: Structure and Characteristics Technical Cards*", ICCROM, Rome, (1980).

19. Coghlan, H. H., "*Notes on the Prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World*", Occasional Paper on Technology, 4, Second Edition, T. K., Penniman and B. M. Blackwood (Eds.), Oxford University Press, Oxford, (1975).

20. Caron, R. N., Barth, R. G. and Tyler, D. E., "Metallography and Microstructures of Copper and its Alloys", ASM handbook, Metallography and Microstructures, Vol. 9, ASM International, Materials Park, Ohio, pp. 775-788, (2004).

21. Siano, S., Bartoli, L., Santisteban, J. R., Kockelmann, W., Daymond, M. R., Miccio, M. and De Marinis, G., Non-Destructive Investigation of Bronze Artefacts from the Marches National Museum of Archaeology Using Neutron Diffraction, Archaeometry, Vol. 48, pp. 77–96, (2006),.

22. Bachmann, H. G., "*The Identification of Slags from Archaeological Sites*", Occasional Publications, No. 6, Institute of Archaeology, UCL, London, (1982).

23. Cawte, H. J., "The archaeometallurgy of Dragon Field and Peun Baolo, Savannakhet Province, Laos: Stage one, results and recommendations", Unpublished Report provided to Lang Xiang Mineral Ltd., (2009), http://eprints.jcu.edu.au/10770.

24. Craddock, P., "Early Metal Mining and Production", Smithsonian Institution Press, Washington D. C., (1995).

25. Bennett, A., The Contribution of Metallurgical Studies to South-East Asian Archaeology, World Archaeology, Vol. 20, pp. 329-351, (1989).

26. Rostoker, W., Pigott, V. C. and Dvorak, J., Direct Reduction to Copper metal by Oxide Sulphide Mineral Interaction, Archaeomaterials, Vol. 3, pp. 69-87, (1989).

27. Pigott, V. C., Rogers, H. C. and Nash, S. K., "Archaeometallurgical Investigations at Tal-e Malyan: The Evidence for Tin-Bronze in the Kaftari Phase", Yeki Bud, Yeki Nabud: Essays on the Archaeology of Iran in Honor of William M. Sumner, Miller, N. F. and Abdi, K. (Eds.), University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia, pp. 161-175, (2003).

28. Oudbashi, O., Emami, S. M. and Davami, P. "Bronze in Archaeology: A review of Archaeometallurgy of Bronze in Ancient Iran", Copper Alloys – Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes, Collini. L., (Ed.), InTech, Rijeka, pp. 153-178, (2012),

http://cdn.intechopen.com/pdfs/30478/InTech-Bronze_in_archaeology_a_review_of_the_archaeometallurgy_ f_bronze_in_ancient_iran.pdf.